

Г.А. Калошин, С.А. Шишкин

## Расчет дальности видения световых сигналов навигационного комплекса со сканирующим полупроводниковым лазером с электронной накачкой. Ч. II. Аэрозольное ослабление и результаты расчетов

*Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск*

Поступила в редакцию 14.07.2006 г.

Представлены результаты численных расчетов дальности видимости зрительного лазерного навигационного комплекса со сканирующим полупроводниковым лазером с электронной накачкой (СПЛЭН) в условиях прибрежной атмосферы. Результаты рассматриваются в сравнении с данными морского эксперимента, проведенного на Финском заливе в районе Шепелевского маяка, и летного эксперимента аналогичного комплекса. Полученная дальность видимости огней навигационного комплекса со СПЛЭН составляет  $L_{\text{пор}} \approx (0,5 \div 1)S_m$  для дневных и ночных условий соответственно. Сравнение с экспериментальными данными показывает, что при небольших значениях  $S_m$  наблюдаются незначительные расхождения с расчетными дальностями. С ростом  $S_m$  расхождения становятся существенными.

### Введение

Задача видения излучения навигационного комплекса со сканирующим полупроводниковым лазером с электронной накачкой (СПЛЭН), далее — лазерного маяка, в приземном слое морской прибрежной атмосферы относится к теории переноса излучения и описывается уравнением переноса излучения (УПИ). Сложность решения УПИ, в основном, определяется геометрией задачи и закономерностями изменения характеристик среды. Поэтому при решении УПИ используются различные приближения [1, 2]. Применение тех или иных приближений определяется требованием к точности получаемых результатов при необходимых и достаточных входных данных, характеризующих фотометрические пространственно-угловые характеристики излучения, оптические свойства рассеивающей среды и параметры приемника излучения.

Кратко проанализируем некоторые приближения в решении УПИ применительно к оценке эффективности лазерного маяка по дальности. В настоящее время считается, что для изотропного рассеяния теория переноса излучения достаточно хорошо разработана [2]. Для анизотропного рассеяния, имеющего место в атмосфере, развиваются численные и приближенные методы решения УПИ. Среди численных наиболее развиты методы характеристик, Монте-Карло и сферических гармоник. Основными приближениями, обеспечивающими аналитические решения УПИ для лазерных пучков, являются малоугловое, малоугловое диффузионное и диффузионное приближения. Первые два в основном при-

меняются для сред с сильно вытянутой индикатрисой рассеяния, таких как туманы или взвеси в воде. Однако в силу низкой эффективности оптических средств, в частности лазерных зрительных средств навигационного оборудования (СНО), при видении в тумане, малоугловое приближение не используется. Обеспечение видения в тумане приемлемого для практики качества в настоящее время находится за пределами технических возможностей человека [3]. Результаты диффузионного приближения относятся к изотропным источникам и к средам со сферической индикатрисой рассеяния. В нашем случае имеется точечный мононаправленный лазерный источник, пучок излучения которого распространяется в анизотропной рассеивающей среде.

В целом, несмотря на успехи в решении УПИ как численными методами, так и в рамках отдельных приближений, в настоящее время нельзя говорить о наличии аналитических выражений для расчета поля излучения узкого лазерного пучка, удобных для практического использования. Численные методы трудоемки, а приближенные представляются в виде интегралов достаточно сложного вида [2]. Кроме того, в приближенных аналитических выражениях нет возможности учитывать микрофизический состав аэрозоля, его зависимость от метеопараметров, геометрии задачи и типа воздушной массы.

Поэтому в решении задачи видения излучения лазерного маяка в приземном слое морской прибрежной атмосферы будем исходить из решения УПИ для интенсивности лазерного пучка при отсутствии излучения других источников в среде с использованием положений теории Ми.

# 1. Аэрозольное ослабление в приземном слое морской прибрежной атмосферы

## 1.1. Выбор и обоснование метода расчета

Известно, что основные энергетические потери оптического сигнала видимого диапазона при его распространении в приземном слое обусловлены в значительной степени аэрозольным ослаблением [4–10]. В качестве основной количественной характеристики ослабления лазерного пучка в аэрозольной атмосфере принят объемный показатель аэрозольного ослабления  $\alpha(\lambda)$ , входящий в выражение закона Бугера и равный сумме объемных показателей рассеяния  $\alpha_p(\lambda)$  и поглощения  $\alpha_n(\lambda)$ . Основной вклад при этом вносит рассеяние на частицах аэрозоля, а поглощающими свойствами частиц прибрежного аэрозоля можно пренебречь. Имеется в виду, что для видимой области и в условиях дымки значения  $\alpha(\lambda)$  и  $\alpha_p(\lambda)$  практически совпадают. Поэтому при оценке энергетики оптического сигнала лазерного маяка в работе учитывается только аэрозольное ослабление. В качестве рассеивающей среды выбрана атмосферная дымка, составляющая, как широко известно, более 90% всех атмосферно-оптических ситуаций в атмосфере.

При зрительном наблюдении точечных источников света, каким является источник рассматриваемого лазерного маяка, в условиях морских прибрежных дымок можно предположить, что величина регистрируемого рассеянного излучения незначительна и изменение светового потока с приемлемой для практики точностью описывается законом Бугера.

Известно, что величина поправки в общую освещенность за счет кратно рассеянного излучения во многом зависит от оптической толщи  $\tau$  и угла поля зрения  $\psi$  приемника. При значении  $\psi$ , равном нескольким градусам, величина поправки оказывается заметной уже при  $\tau \geq 1$  [2]. При  $\psi$ , равном нескольким угловым минутам, что соответствует угловому размеру отдельного светочувствительного элемента сетчатки глаза, вклад кратно рассеяния учитывается, начиная со значений  $\tau \geq 15 \div 23$  [4]. Как уже было отмечено в [11], для лазерного маяка пороговые условия определяются только тремя величинами: блеском или освещенностью на зрачке  $E$ , длительностью проблеска  $\Delta t_{пр}$  и яркостью фона  $B_{\phi}$ , на котором источник наблюдается.

Если в месте приема освещенность зрачка превышает пороговую освещенность, то точечный источник виден. На практике для повышения надежности обнаружения пороговая освещенность умножается на коэффициент запаса, который в зависимости от задачи может изменяться в широких пределах, достигая 50 [12].

Как следствие закона Бугера, для расчета освещенности, создаваемой точечным источником, широко применяется соотношение Аллара [12, 13]:

$$E = \frac{I_0 \cdot 10^{-6}}{L^2} e^{-\alpha(\lambda)L}, \quad (1)$$

где  $I_0$  — осевая сила излучения, Вт/ср;  $L$  — расстояние до наблюдателя, км;  $\alpha(\lambda)$  — коэффициент аэрозольного ослабления на длине волны  $\lambda$ , км<sup>-1</sup>;  $\tau = \alpha(\lambda)L$  есть оптическая толщина аэрозольной среды.

Следует отметить, что использование выражения (1) справедливо для сумеречных и ночных условий наблюдения. В дневных условиях и в ранних сумерках необходимо учитывать влияние вуалирующего характера дымки, определяемое степенью засветки солнечным излучением рассеивающего слоя в направлении визирования. С учетом влияния вуалирующей дымки выражение (1) записывается в виде [13]:

$$E = \frac{(I_0 - (B_{\phi} - B'_{\phi})s) \cdot 10^{-6}}{L^2} e^{-\tau}, \quad (2)$$

где  $B_{\phi}$  — яркость фона вблизи источника, измеренная вдоль линии визирования, Вт/(ср · м<sup>2</sup>);  $B'_{\phi}$  — среднее значение яркости фона в отсутствие дымки, Вт/(ср · м<sup>2</sup>);  $s$  — площадь излучающей поверхности источника, м<sup>2</sup>.

Произведение  $(B_{\phi} - B'_{\phi})s$  в выражении (1) есть дополнительная интенсивность излучения, эквивалентная яркости фона за счет вуалирующего характера дымки. Учет временной и пространственной изменчивости вуалирующей яркости дымки в расчетах обычно осуществляется в задании величины яркости фона [12].

## 1.2. Выбор и обоснование модели для расчета $\alpha(\lambda)$

При расчете энергетики сигнала лазерного маяка одним из ключевых параметров является величина спектрального коэффициента аэрозольного ослабления  $\alpha(\lambda)$ . Согласно существующим в настоящее время представлениям об аэрозоле приземного слоя морской и прибрежной атмосферы его микрофизические и оптические характеристики, которые определяют величину  $\alpha(\lambda)$ , существенным образом зависят от влажности, типа воздушной массы, ветрового режима, связанной с ним величины области разгона волн и имеют ярко выраженный высотный профиль в области высот 0–30 м. При этом высотный профиль наиболее рельефно проявляется в средней ИК-области спектра в диапазонах 3 ÷ 5 и 8 ÷ 12 мкм [14–17]. Влияние химического состава аэрозоля на его микрофизические и оптические характеристики в статье не рассматривается.

До недавнего времени (начало 90-х гг.) основной микрофизической моделью, описывающей аэрозоль приземного слоя морской и прибрежной атмосферы, являлась модель NAVY Aerosol Model (NAM), предложенная в [14]. Модель была основана на многолетних массивах экспериментальных данных, полученных на высоте от 10 до 12 м над уровнем моря. Впоследствии появилось много модификаций данной модели, и в настоящее время имеется шестая версия. Модель дает хороший прогноз ослабления оптического излучения для морских условий и условий открытого океана на высоте 10–12 м над уровнем моря.

Однако экспериментальные исследования начала 90-х гг. показали, что модель NAM дает существенно отличающиеся результаты при прогнозе пропускания на других высотах. Так, экспериментальные исследования распределений частиц по размерам как функции высоты над уровнем моря  $dN/dr$  [15, 16] и экспериментальные исследования прозрачности атмосферы, полученные трансмиссионным методом [18, 19] в рамках программ Electro Optical Propagation Assessment in Coastal Environment (EOPACE) и Rough Evaporation Duct (RED), показали существенные вариации  $dN/dr$  в зависимости от высоты измерения в приземном слое.

Для устранения этих противоречий модель NAM была модифицирована и получила название ANAM (Advanced NAVY Aerosol Model) [17]. Одновременно с этим в [20] была выявлена существенная зависимость  $dN/dr$  от величины области разгона волн, характеризующая параметром *fetch*, которая не учитывается в модели ANAM. Fetch — это расстояние от одного берега по направлению ветра до места проведения измерений (в км) по открытой воде с наветренной стороны.

Fetch широко используется в океанологии при исследованиях влияния волн на береговую линию, при оценках защиты береговых сооружений от волнового воздействия. В нашем случае он характеризует размер области и интенсивность генерации морского солевого аэрозоля. Для определения fetch нужно иметь карту района проведения измерения нужного масштаба с сеткой и знать направление ветра в градусах.

Дальнейшее развитие этих исследований позволило разработать микрофизическую модель аэрозоля прибрежной зоны MEDEX (MEDiterranean Extinction) [21, 22], реалистично описывающую влияние метеопараметров, высотный профиль, ветровой режим, позволяющую через параметр fetch косвенно учесть параметр воздушной массы. Модель основана на более чем 17-летних массивах экспериментальных данных, полученных начиная с 1983 г., в разное время года для Балтийского, Средиземного и Северного морей при исследованиях микрофизического и химического состава аэрозоля прибрежной зоны.

Известен также ряд оптических моделей для расчета  $\alpha(\lambda)$  в приземном слое атмосферы, у которых входными параметрами являются  $\alpha(0,55 \text{ мкм})$  или  $\alpha(\lambda_1, \lambda_2)$ , влажность и ряд эмпирических коэффициентов, либо являющихся функцией длины волны в модели черноморской прибрежной дымки [6, 7], либо соответствующих типу оптической погоды для континентальных условий [8–10]. Однако в этих моделях не учитываются отмеченные выше закономерности. Кроме того, использование континентальной модели [8, 10] представляется затруднительным. Это связано с принадлежностью к другой климатической зоне. Кроме того, имеется некоторая субъективность в идентификации 10–11 типов оптической погоды и в учете промежуточных состояний атмосферы между этими типами, которые могут быть продолжительными и сопоставимыми по времени с основными типами.

### 1.3. Подпрограмма MaexPro для расчета $\alpha(\lambda)$

Согласно известным решениям Ми коэффициент аэрозольного ослабления  $\alpha(\lambda)$  связан с микрофизическими характеристиками аэрозоля соотношением [23–25]:

$$\alpha(\lambda) = \int_0^{\infty} K(\rho, m) [dN/dr] \pi r^2 dr, \quad (3)$$

где  $dN/dr$  — функция распределения аэрозольных частиц по размерам,  $\text{см}^{-3} \cdot \text{мкм}^{-1}$ ;  $K(\rho, m)$  — коэффициент Ми (фактор ослабления);  $\rho = 2\pi r/\lambda$  — относительный размер частицы;  $m$  — комплексный показатель преломления;  $r$  — радиус аэрозольных частиц, мкм.

Расчет  $dN/dr$  осуществлялся по последней версии микрофизической модели MEDEX [26]. Модель характеризуется 4-модальной функцией распределения частиц по размерам и записывается в виде суммы четырех логнормальных функций:

$$\frac{dN}{dr} = \sum_{i=1}^4 \frac{A_i}{f} \exp\{-C_i (\ln r / r_{0i})^2\}, \quad (4)$$

где  $A_i$ ,  $C_i$  — амплитуда и ширина  $i$ -й моды;  $r_{0i}$  — модальный радиус  $i$ -й моды, мкм ( $r_{01} = 0,03$ ;  $r_{02} = 0,24$ ;  $r_{03} = 2$ ;  $r_{04} = 10 \text{ мкм}$ );  $f = [((2 - S)/6(1 - S))]^{1/3}$  — функция (фактор) роста, зависящий от влажности;  $S \equiv f/100$  — индекс насыщения;  $f$  — относительная влажность воздуха, %.

При относительной влажности воздуха  $f = 80\%$  значение функции роста  $f = 1$ . Амплитуда и ширина различных мод параметризованы как функции величины области разгона волн (fetch) и скорости ветра [21, 22].

Модель выполнена для спектра размеров частиц от 0,001 до 100 мкм по радиусу  $r$  и развита к настоящему времени для диапазона высот  $H$  от 0 до 25 м, где, по нашему мнению, происходят наиболее существенные изменения микрофизического состава. Диапазон изменения скорости ветра  $U$  составляет от 3 до 18 м/с; величина области разгона волн  $X$  находится в диапазоне от 3 до 120 км; относительная влажность  $f$  — в диапазоне от 40 до 98%.

На рис. 1 в качестве примера приведен результат расчета функции  $dN/dr$  по модели MEDEX для наиболее характерных входных параметров:  $f = 80\%$ ,  $U = 3,5 \text{ м/с}$ ,  $X = 70 \text{ км}$ ,  $H = 10 \text{ м}$ .

В модели MEDEX действительные и мнимые части комплексного показателя преломления для компонентов вещества аэрозоля были взяты из графических данных экспериментальных работ [27–29] и методом экстраполяции этих данных рассчитаны для диапазона длин волн  $\lambda$  от 0,2 до 14 мкм с шагом  $\Delta\lambda = 0,0001 \text{ мкм}$ . Вещество аэрозоля представлено в виде комбинации сухого вещества, морской соли и воды [26].

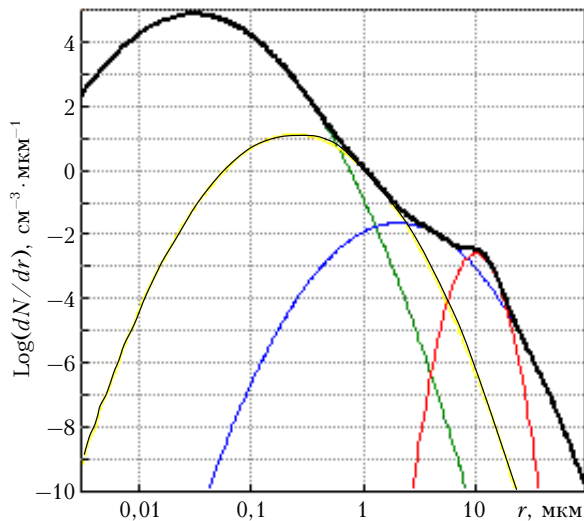


Рис. 1. Функция распределения частиц по размерам  $dN/dr$  на высоте 10 м

Кроме того, при расчете коэффициента аэрозольного ослабления  $\alpha(\lambda)$  использовалась следующая экстраполяция, связанная с высотным профилем функции роста  $f$  [30]:

$$\left(\frac{\alpha_H}{\alpha_{0M}}\right) = \left(\frac{0,037}{1,017 - f_H/100}\right)^{0,84}, \quad (5)$$

где  $\alpha_{0M}$  — коэффициент аэрозольного ослабления на высоте  $H_0 = 0 \text{ км}^{-1}$ ;  $f_H$  — функция роста на высоте  $H$ .

Расчет высотных профилей функции  $f$  осуществляется при следующих условиях:

- если  $20 \text{ м} \leq H \leq 25 \text{ м}$ , то  $f = f_{25M}$ ;
- если  $H \leq 20 \text{ м}$  и  $f \leq f_{25M}$ , то  $f = f_{25M}$ ;
- иначе, если  $H \leq 20 \text{ м}$ , то  $f = (f_{25M} + 7) \times H^{-0,03}$ .

Здесь  $f_{25M}$  — функция роста на высоте  $H = 25 \text{ м}$ . Экстраполяция годится для диапазона значений  $f$  от 40 до 98%.

Подпрограмма MaexPro (Marine aerosol extinction Profile) (рис. 2) осуществляет расчет:

- спектральных и вертикальных профилей коэффициентов  $\alpha(\lambda)$  в соответствии с выражениями (3)–(5);
- функции распределения частиц по размерам, сечения рассеяния, распределения объемов;
- спектральных профилей отдельных мод;
- комплексных показателей преломления компонентов вещества аэрозоля.

Входными данными в подпрограмму MaexPro являются следующие величины:

- $X(70)$  — fetch, км;
- $f(80)$  — относительная влажность, %;
- $U(3,5)$  — скорость ветра на высоте 10 м, м/с;
- $H(10)$  — высота над морской поверхностью, м;
- $\Delta H(1)$  — шаг по высоте, м;
- $r_{\min}(0,001)$ ,  $r_{\max}(100)$ ,  $\Delta r(0,01)$  — минимальный и максимальный радиусы и шаг по радиусу, мкм;
- $\lambda_{\min}(0,2)$ ,  $\lambda_{\max}(40)$ ,  $\Delta \lambda(0,0001)$  — минимальная и максимальная длина волны излучения и шаг по длине волны соответственно, мкм.

В скобках указаны наиболее характерные значения входных параметров, которые задаются по умолчанию и могут быть изменены по желанию пользователя в рамках применимости модели.

Подпрограмма MaexPro является постоянно совершенствуемой компьютерной программой и используется для оценки энергетики сигнала в месте приема, ключевым входным параметром в которой является fetch [31, 32], она позволяет давать оценку аэрозольного ослабления как функции стандартных легко измеряемых метеорологических параметров, микрофизического состава аэрозоля, спектрального диапазона приемника и геометрии трассы наблюдения. Спектральный ход коэффициента  $\alpha(\lambda)$  может быть представлен как графически, так и в виде таблиц. В программе предусмотрены: команда Overplot для наложения или изменения графиков, интерполяция профилей, масштабирование и трассировка, всевозможные копирования, представление данных, удобных для входа в код MODTRAN, и т.п.

Пользовательский интерфейс подпрограммы MaexPro полностью управляется с помощью «мыши» и действует на стандартном PC под операционной системой Windows. Время расчета спектрального хода  $\alpha(\lambda)$  зависит от необходимого разрешения по длине волны  $\lambda$ , радиусу частиц  $r$  и высоте  $H$ . При высоком разрешении по этим параметрам время счета не превышает десятков секунд. Другие расчетные характеристики, такие как сечение рассеяния, распределение объемов, спектральные ходы отдельных мод, выполняются почти мгновенно.

## 2. Программа Range для расчета дальности видимости зрительных СНО

Для расчета энергетических характеристик лазерного маяка была использована предварительная версия программно-технологического пакета Range, которая позволяет проводить расчеты дальности видимости маяков, береговых светящихся знаков, плавучих предостерегательных знаков со светооптическими аппаратами, оснащенных традиционными, светодиодными и лазерными источниками света.

Программа Range (рис. 3) построена по модульному принципу. Наличие базы данных позволяет пользователю делать выбор различных типов СНО, источников излучения и условий распространения и регистрации оптического сигнала.

В программе Range для расчета дальности видимости зрительных СНО реализована методика, описанная в [11], с учетом расчетных выражений подразд. 1.1–1.3 (рис. 4).

В общем виде алгоритм расчета дальности состоит из задания:

- энергетических характеристик лазерного маяка;
- параметров атмосферы;
- пороговых характеристик зрения.

Энергетические характеристики маяка определялись через входные параметры — спектральную мощность и расходимость излучения, которые использовались для расчета осевой силы света излучения [11].

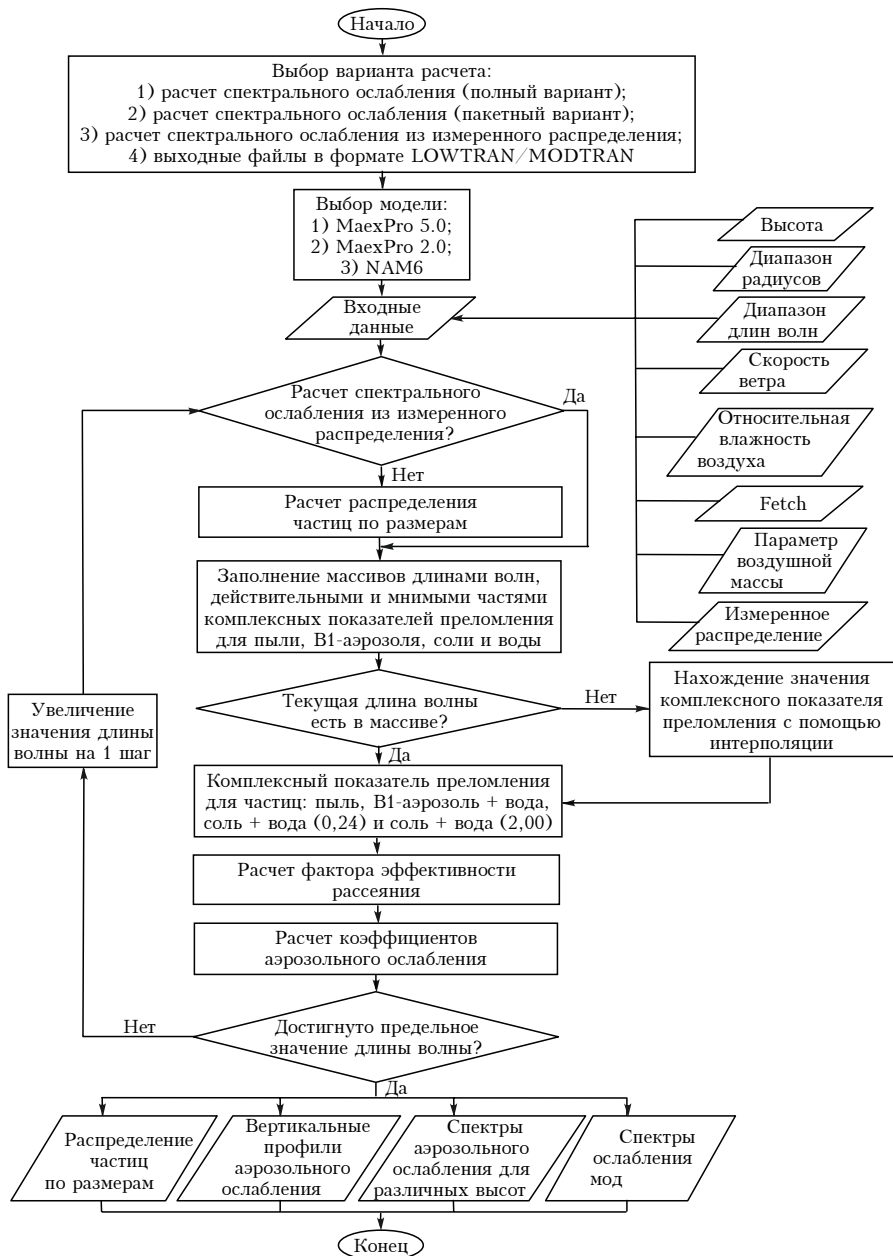


Рис. 2. Структурная схема подпрограммы MaexPro

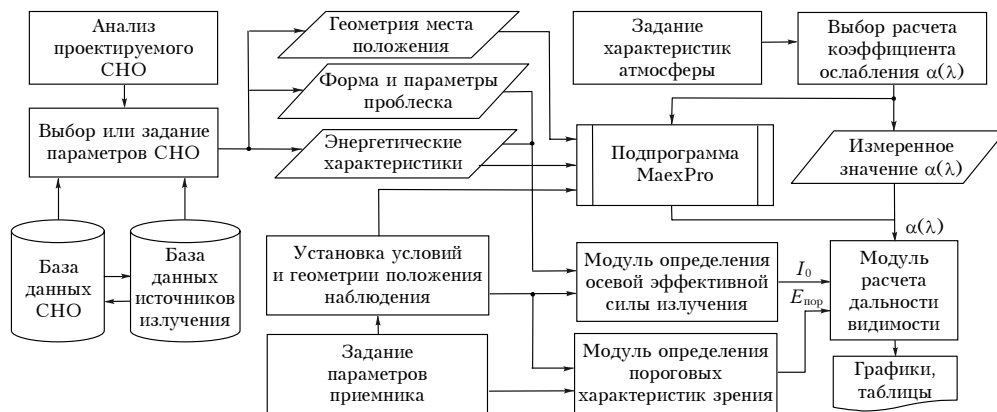


Рис. 3. Функциональная схема программы Range

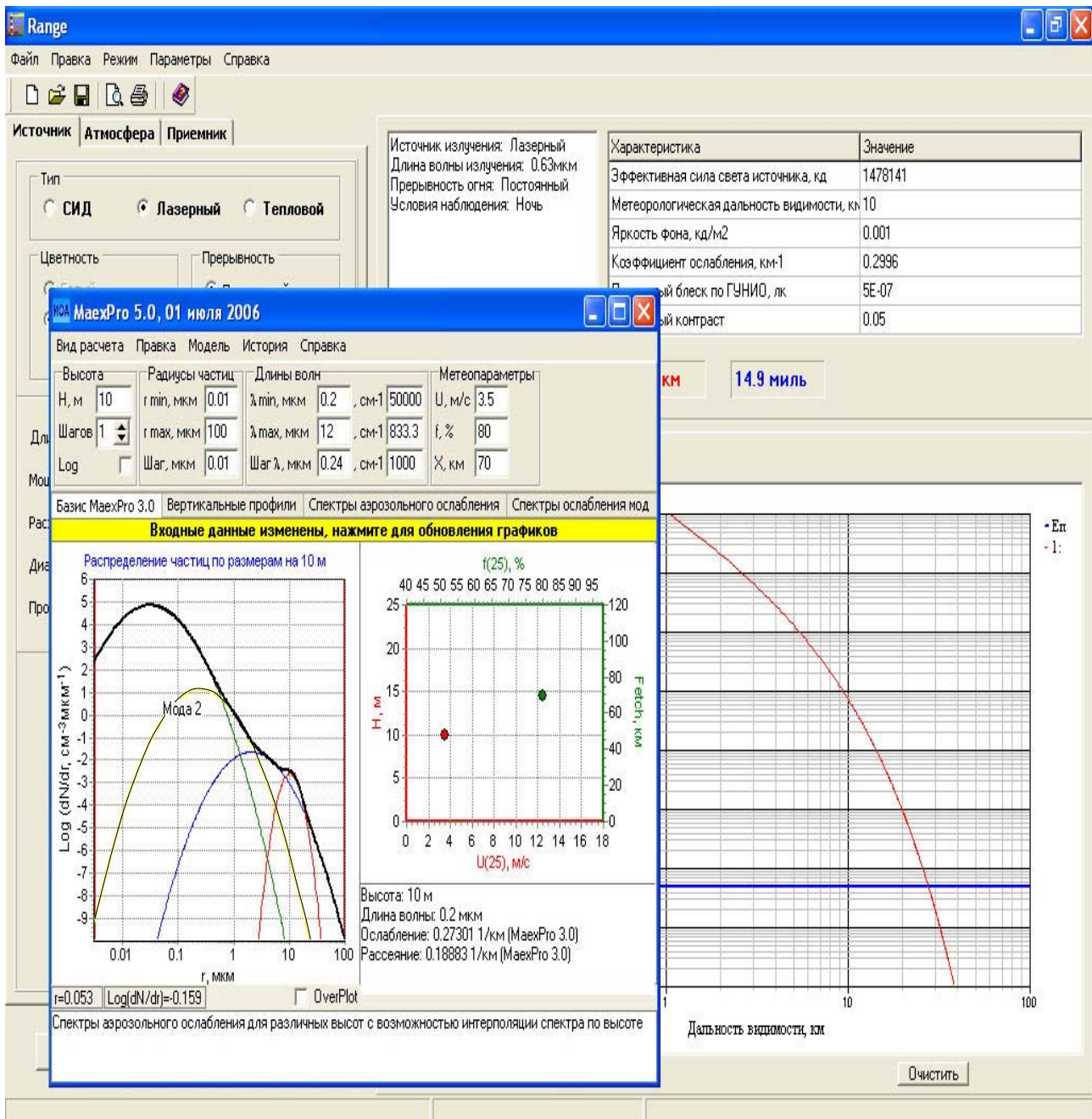


Рис. 4. Интерфейс программы Range с подпрограммой MaexPro

В качестве входных параметров среды можно использовать либо величину метеорологической дальности видимости  $S_m$ , либо спектральный коэффициент ослабления  $\alpha(\lambda)$ . Отметим, что если коэффициент  $\alpha(\lambda)$  определен или измерен для заданных геометрии места расположения СНО и метеоусловий, то значения  $\alpha(\lambda)$  могут быть введены в программу Range непосредственно, без использования подпрограммы MaexPro.

Пороговые характеристики зрения задавались величиной спектрального порогового блеска  $E_{пор}$  и были взяты из [11, 12] с учетом рекомендаций ГУНИО [33] и Международной ассоциации маячных служб (МАМС) [34].

Оценка дальности видимости СНО сводилась к вычислению освещенности  $E$ , создаваемой излучением на зрачке глаза наблюдателя, и сравнению полученного значения с величиной спектрального порогового блеска  $E_{пор}$  для соответствующих фоновых условий наблюдения.

### 3. Результаты расчета

Расчет дальности видимости лазерного маяка на основе СПЛЭН проведен для условий, представленных в таблице [35]. Эти условия были выбраны для соответствия условиям экспериментальной работы [36] и данным морского эксперимента, проведенного на

Финском заливе 25–26 июня 2003 г. в районе Шепелевского маяка.

**Значения метеорологической дальности видимости  $S_M$  и коэффициента аэрозольного ослабления  $\alpha(0,55)$ , рассчитанные на высоте 10 м над уровнем моря**

$S_M$ , км	$\alpha(0,55)$ , км <sup>-1</sup>	Метеорологические параметры		
		$U$ , м/с	$f$ , %	Fetch, км
10	0,297	11	81	90
30	0,1	3	65	70

Поскольку на борту судна не возможно было определить метеорологическую дальность видимости  $S_M$ , то для имевших место в эксперименте геометрии и условий наблюдения соответствующие значения  $\alpha(\lambda)$  на длине волны 0,55 мкм рассчитывались по формуле Кошмидера:

$$S_M = -\ln(k)/[\alpha(\lambda)], \quad (6)$$

где  $k$  – пороговый контраст, равный 0,05 в соответствии с нормативными требованиями [33, 34]. Значения  $S_M$ , рассчитанные по выражению (6), представлены в таблице.

Результаты расчетов дальности обнаружения по программе Range представлены на рис. 5.

Здесь показаны значения дальности обнаружения для ночных (квадратики), сумеречных (кружки) и дневных (ромбики) условий соответственно. Жирные значки соответствуют пороговым, а светлые –

комфортным значениям дальности обнаружения. При этом значения  $L$  в верхней части соответствуют дневным и сумеречным условиям наблюдения, а в нижней – ночным условиям.

Кроме того, на рис. 5 приведены результаты сравнения расчетных дальностей видимости с экспериментальными данными, полученными на Финском заливе 25–26 июня 2003 г. в районе Шепелевского маяка и в летном эксперименте с использованием аналогичного комплекса [36]. Летный эксперимент проводился в ночных и дневных условиях при значениях  $S_M$ , равных 10 и 20 км. Соответствующие значения дальностей видимости нанесены на рис. 5 в виде горизонтальных жирных (летный эксперимент) и светлых отрезков (морской эксперимент) вверх и вниз вдоль оси абсцисс для дня и ночи соответственно. Морской эксперимент проводился также в ночных и дневных условиях при значениях  $S_M$ , равных 10 и 30 км. Здесь левый конец отрезков соответствует значению дальности опознавания огня, правый – обнаружения.

Как видно из рис. 5, расчетная дальность видимости огней лазерного навигационного комплекса со СПЛЭН в морской прибрежной атмосфере для любых условий наблюдения всегда меньше величины  $S_M$ .

Для дневных условий дальность обнаружения всех трех примерно одинакова и составляет  $L_{пор} \approx 3 \div 4$  км при  $S_M = 10$  км и  $L_{пор} \approx 5 \div 6$  км при  $S_M = 30$  км. Это соответствует  $L_{пор} \approx 0,5S_M$ .

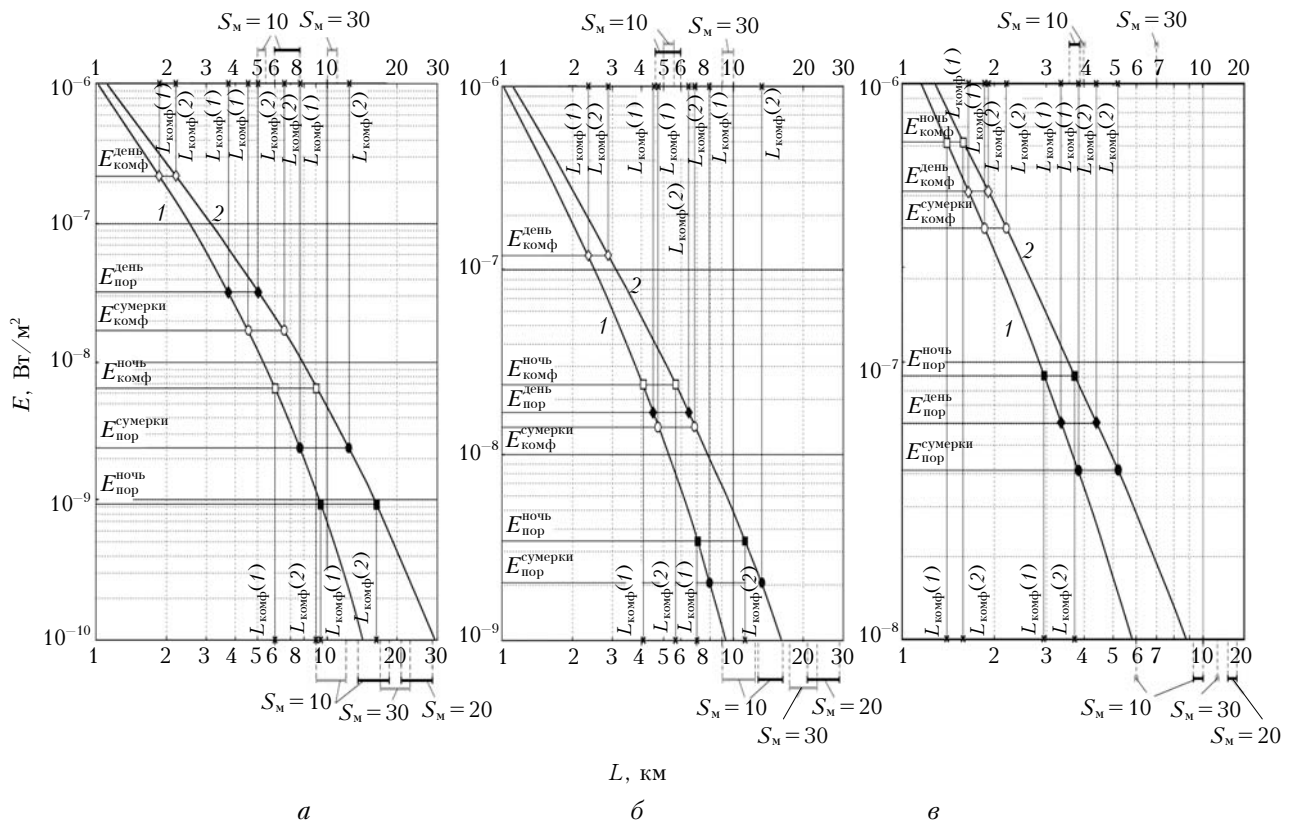


Рис. 5. Зависимость освещенности  $E$ , создаваемой излучением навигационного комплекса со СПЛЭН, на расстоянии  $L$  при различных значениях  $S_M$  на длинах волн  $\lambda$ : а – 0,52 мкм, б – 0,57 мкм, в – 0,63 мкм;  $S_M = 10$  км (кривая 1), 30 км (2);  $L_{комф}$  (1),  $L_{пор}$  (1) – для кривой 1;  $L_{комф}$  (2),  $L_{пор}$  (2) – для кривой 2

В сумеречных и ночных условиях наблюдения дальность видимости красного огня меньше дальности видимости огней зеленого и желтого цветов. Так, дальность видимости красного огня составляет  $L_{\text{пор}} \approx 4 \div 5$  км в сумерках и  $\approx 3 \div 4$  км ночью, а зеленого и желтого огней примерно одинакова и составляет  $L_{\text{пор}} \approx 7 \div 9$  км при  $S_m = 10$  км и  $L_{\text{пор}} \approx 11 \div 14$  км при  $S_m = 30$  км. Таким образом, в сумеречных и ночных условиях наблюдения дальность видимости желтого и зеленого огней маяка примерно одинакова и составляет  $L_{\text{пор}} \approx S_m$ . Для огня красного цвета дальность видимости  $L_{\text{пор}} \approx 0,5S_m$ . Это существенно ниже, чем для лазерных створных маяков, которые имеют  $L_{\text{пор}} \approx 1,5 \div 2,5S_m$  днем и ночью соответственно для длины волны излучения  $\lambda = 0,63$  мкм [32].

Для комфортных условий видимости наблюдаются аналогичные зависимости. При  $S_m = 10$  км ночью и в сумерках дальность комфортного обнаружения составляет  $L_{\text{комф}} \approx 1,3 \div 2$  км для красного огня, что соответствует  $L_{\text{пор}} \approx 0,15S_m$ , и для огней зеленого и желтого цветов  $L_{\text{комф}} \approx 4 \div 6$  км, что соответствует  $L_{\text{пор}} \approx 0,5S_m$ .

Сравнение результатов расчета и эксперимента для  $S_m = 10$  км иллюстрирует удовлетворительное согласие. При  $S_m = 30$  км наблюдаются заметные расхождения, причем как для дневных, так и для ночных условий. К сожалению, ввиду недостатка данных по энергетическим и пространственным характеристикам лазерных пучков, условиям и геометрии наблюдения, имевшим место в летном эксперименте в условиях средних широт [36], провести более детальное сопоставление с расчетными результатами оказалось затруднительным.

### Заключение

Расчитанная дальность видимости огней навигационного комплекса со СПЛЭН составляет  $L_{\text{пор}} \approx 0,5 \div 1S_m$  для дневных и ночных условий соответственно.

Сравнение с данными летного эксперимента, полученными с помощью аналогичного навигационного комплекса, показывает, что при небольших значениях  $S_m$  наблюдаются незначительные расхождения с расчетными дальностями. С ростом  $S_m$  расхождения становятся существенными. По-видимому, это связано со спецификой условий проводимого эксперимента.

Эффективность по дальности навигационного комплекса со СПЛЭН существенно ниже лазерных створных маяков, что объясняется меньшим энергетическим потенциалом комплекса, связанным с принципом формирования зоны ориентирования. Тем не менее рассмотренный комплекс удовлетворяет требованиям по дальности для СНО прибрежной зоны.

1. Зега Э.П., Иванов А.П., Кацев И.Л. Перенос изображения в рассеивающей среде. Минск: Наука и техника, 1985. 240 с.
2. Будаев В.П. Малоугловая теория диффузного светового поля в мутной среде: Докт. дис. М.: МЭИ, 1998. 275 с.
3. Карасик В.Е., Орлов В.М. Лазерные системы видения: Уч. пособие. М.: Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 2001. 352 с.

4. Зуев В.Е., Креков Г.М. Оптические модели атмосферы. Л.: Гидрометеониздат, 1986. 256 с.
5. Тимофеев Ю.М., Васильев А.В. Теоретические основы атмосферной оптики. СПб.: Наука, 2003. 474 с.
6. Кабанов М.В., Панченко М.В., Пхалазов Ю.А., Веретенников В.В., Ужegov В.Н., Фадеев В.Я. Оптические свойства прибрежных атмосферных дымок. Новосибирск: Наука, 1988. 201 с.
7. Киселева М.С., Голованов С.Н., Казбанов В.А., Решетникова И.Н., Синельникова Г.Е., Смирнов А.П. Программа расчета спектральной прозрачности атмосферы в области спектра 0,2–25,0 мкм // Оптик. ж. 2000. Т. 67. № 5. С. 56–61.
8. Филиппов В.Л., Макаров А.С., Иванов В.П. Оптическая погода в нижней тропосфере (эмпирический метод расчета ослабления ИК-излучения). Казань: Изд-во «Дом печати», 1998. 183 с.
9. Макаров А.С., Омелаев А.И., Филиппов В.Л. Введение в технику разработки и оценки сканирующих тепловизионных систем / Под ред. В.Л. Филиппова. Казань: Изд-во «Унипресс», 1998. 320 с.
10. Бузаенко А.Г., Иванов В.П., Омелаев А.И., Тевяшов В.И., Филиппов В.Л. Физические основы и техника измерений в тепловидении / Под ред. В.Л. Филиппова. Казань: Отечество, 2003. 352 с.
11. Калошин Г.А., Шишкин С.А. Расчет дальности видения световых сигналов навигационного комплекса со сканирующим полупроводниковым лазером с электронной накачкой. Ч. I. Энергетические параметры источника и пороговые характеристики зрения // Оптика атмосф. и океана. 2007. Т. 20. № 3. С. 286–290.
12. Забелина И.А. Расчет видимости звезд и далеких огней. Л.: Энергоатомиздат, 1983. 144 с.
13. Ковалев В.А. Видимость в атмосфере и ее определение. Л.: Гидрометеониздат, 1988. 216 с.
14. Gathman S.G. Optical properties of the marine aerosol as predicted by the Navy aerosol model // Opt. Eng. 1983. V. 22. N 1. P. 57–62.
15. J. Van Eijk A.M., Leeuw de G. Modeling aerosol particle size distributions over the North sea // J. Geophys. Res. 1992. V. 97. N 9. P. 14417–14429.
16. Leeuw de G. Vertical profiles of giant particles close above the sea surface // Tellus. V. 38 B. 1986. P. 51–61.
17. Gathman S.G., J. Van Eijk A.M., Cohen L.H. Characterizing large aerosols in the lowest level of the marine atmosphere // Proc. SPIE. 1998. V. 3433. N 41. P. 41–52.
18. Anderson K., Brooks B., Caffrey P. The RED Experiment: An assessment of boundary layer effects in a trade winds regime on microwave and infrared propagation over the sea // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 2004. V. 85. N 9. P. 1355–1365.
19. Jensen D.R., Gathman S.G., Zeisse C.R., McGrath C.P., Leeuw de G., Smith M.H., Frederickson P.A., and Davidson K.L. Electro-optical propagation assessment in coastal environments (EOPACE): summary and accomplishments // Opt. Eng. 2001. V. 40. N 8. P. 1486–1498.
20. Piazzola J., Forget P., Despiau S. A sea spray generation function for fetch-limited conditions // Ann. Geophys. 2002. V. 20. N 1. P. 121–131.
21. Piazzola J., Kaloshin G., G. De Leeuw, J. Van Eijk A.M. Aerosol extinction in coastal zone // Proc. SPIE. 2004. V. 5572. P. 94–100.
22. Piazzola J., Kaloshin G. Performance evaluation of the coastal aerosol extinction code «MEDEX» with data from the Black Sea // J. of Aerosol Sci. 2005. V. 36. N 3. P. 341–359.
23. Борен К., Хафмен Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами. М.: Мир, 1986. 660 с.
24. Mishchenko M.I., Travis L.D., Lacis A.A. Scattering, absorption and emission of light by small particles. New



- York: Cambridge University Press. Electronic edition, 2004. 450 p.
25. *Friedlander S.K.* Smoke, dust and haze: fundamentals of aerosol dynamics. Oxford University Press US, March 1, 2000. 432 p.
  26. *Kaloshin G., Piazzola J.* The Coastal Aerosol Microphysical Model // Proc. of the 23<sup>rd</sup> Int. Laser Radar Conf. Nara, Japan, 24–28 July, 2006. P. 423–426.
  27. *Volz F.E.* IR index of atmospheric aerosol substances // Appl. Opt. 1972. V. 11. N 4. P. 755–759.
  28. *Volz F.E.* Infrared optical constants of ammonium sulfate, Sahara dust, volcanic pumice and fly ash // Appl. Opt. 1973. V. 12. N 3. P. 564–568.
  29. *Hale G.M., Query M.R.* Optical constants of water in the 200 nm to 200  $\mu$ m wavelength region // Appl. Opt. 1973. V. 12. N 3. P. 555–563.
  30. *Kaloshin G.* Spectral Transparency of the Sea and Coastal Atmosphere Surface Layer // Proc. of the 23<sup>rd</sup> Int. Laser Radar Conf. Nara, Japan, 24–28 July, 2006. P. 427–428.
  31. *Kaloshin G.A., Piazzola J., Shishkin S.A.* Numerical modeling of influence of meteorological parameters on aerosol extinction in the marine atmospheric surface layer // Nucleation and Atmospheric Aerosols 2004: 16<sup>th</sup> Int. Conf. Kyoto, Japan 2004. Eds: Mikio Kasahara & Markku Kulmala. Kyoto University Press, 2004. P. 352–354.
  32. *Калошин Г.А., Шишкин С.А.* Методические вопросы расчета дальности видимости новых светооптических систем зрительных СНО // Навигация и гидрография. 2004. № 18. С. 34–43.
  33. *Инструкция по навигационному оборудованию (ИНО-2000)*. СПб.: ГУНИО МО РФ, 2001. 328 с.
  34. *The IALA Naviguide*. 4<sup>th</sup> edition. 2002. 220 с.
  35. *Kaloshin G.A., Shishkin S.A.* Technological software Range V.1 for performance assessment new light-optical systems of visual AtoN // Proc. XI Joint Int. Symp. «Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics». Tomsk, 23–26 June, 2004. P. 109–110.
  36. *Олихов И., Косовский Л.* Мобильная лазерная трехцветная навигационная система // Электроника. 1999. № 3. С. 46–49.

***G.A. Kaloshin, S.A. Shishkin. The vision range calculation of light signals of the navigating complex with the scanning semi-conductor laser with electronic pumping. Part II. Aerosol extinction and calculation results.***

Results of numerical calculations of detectable distance of the navigating complex with the scanning semi-conductor laser with electronic pumping (SSLEP) in coastal environment are presented. Results are considered in comparison with the sea experiment data conducted on Finland Gulf near Shepelyovski lighthouse, and the flight test of the similar complex. The received detectable distance of SSLEP makes  $L_d \approx (0,5 \div 1)S_m$  for day and night conditions accordingly. Comparison with experimental data shows that at small values of  $S_m$  insignificant divergences with calculation data are observed. With growth  $S_m$  the divergence of results becomes essential.